

熊本大学学術リポジトリ

Kumamoto University Repository System

Title	繰り返し荷重を受ける合成梁の弾塑性解析法に関する研究
Author(s)	中原, 寛章; 小川, 厚治
Citation	鋼構造論文集, 14(55)
Issue date	2007-09
Type	Journal Article
URL	http://hdl.handle.net/2298/9721
Right	

第3章

繰り返し荷重を受ける合成梁の弾塑性解析法に関する研究

1. 序

筆者らは、鋼構造骨組の耐震性能評価に重点を置き、梁端^{1, 2)}や柱脚³⁾に要求される必要塑性変形性能に関して解析的研究を行ってきた。しかし、既報1～3)で行った一般化ヒンジ法による解析⁴⁾では、コンクリートスラブによる合成効果を鉄骨断面の断面二次モーメントを定数倍することで、曲げ剛性の増大しか考慮しておらず、合成効果によって正曲げと負曲げの梁の耐力・剛性が異なることなどは無視している。その解析結果では、梁端上フランジが引張となる負曲げの塑性変形の方が、正曲げの塑性変形より大きくなっている。一方、兵庫県南部地震などで観察された梁端破断の多くは下側フランジに起こっており^{5, 6)}、これは、正曲げ時のコンクリートスラブの合成効果によって、歪分布の中立軸が鉄骨梁断面重心より上に移動し、梁下側フランジの歪が増加したためと考えられている⁷⁾。コンクリートスラブを考慮に入れた解析を行うことは、実挙動を再現し、耐震性能を適切に評価するためにも重要である。

本研究では、コンクリートスラブによる合成効

果を精度よく近似し、かつ効率的に鋼骨組の解析を行うための方法確立することを目的として、H形鋼合成梁の片持ち梁形式での繰り返し加力実験結果と解析結果を比較することによって、弾性剛性及び、曲げ耐力を適切に追跡できているかどうかを調べる。検討項目としては、有効幅の取り方、コンクリートの応力度-歪度関係における劣化勾配の違いなどである。

2. 解析の概要

2.1 部材のモデル化

解析方法は1次元有限要素法^{8～11)}である。平面保持の仮定に基づく解析方法で、局部座屈や横座屈は考慮していない。部材は材軸方向に複数の要素に分割して、材軸方向の塑性域の拡がりを考慮している。部材断面についても複数の面積集中点の集合体として扱っている。面積集中点内では応力度、歪度は一定である。部材のせん断変形は弾性成分だけを考慮している。

各要素は、鋼部材の主断面に、コンクリート断面を付加することで、合成梁の解析が行えるようにしている。主断面と同様に付加するコンクリート断面も図1に示すように、面積集中点で表している。主断面については、曲げ変形と軸方向変形を考慮しているが、付加コンクリート断面は図2に示すように、主断面に垂直な剛棒に取り付けら

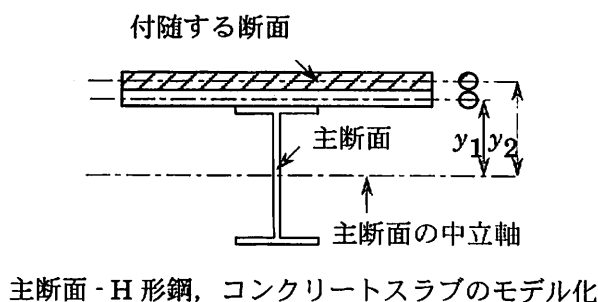


図1 コンクリートのモデル化

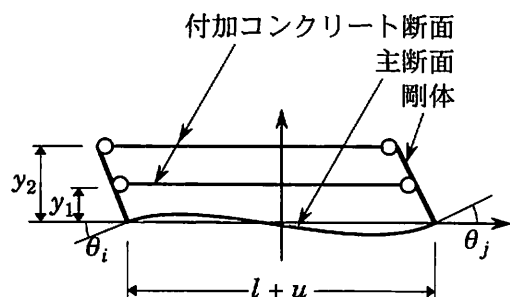


図2 付加断面の変形

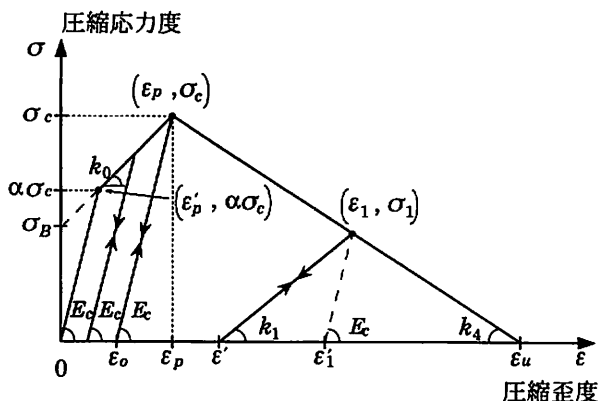


図3 コンクリートの応力度-歪度関係

れた、軸方向変形だけが生じる線材にモデル化している¹²⁾。

鋼材の応力度-歪度関係は、等方硬化と移動硬化を考慮するため、IKモデル^{13, 14)}を用いている。IKモデルを用いることによって、繰返し载荷を受ける鋼梁の荷重-変形挙動が精度よく解析できることは、文献14)に報告している。

2.2 コンクリートの応力度-歪度関係

コンクリートの応力度-歪度関係は、既往の研究^{12, 15, 16)}を参考にしてモデル化を行った。履歴特性はスリップ型とし、圧縮側の初期载荷時は図3に示すように圧縮強度までを2直線、圧縮強度後

の劣化域を1直線とする Trilinear 型としている。また、引張抵抗は無視している。

圧縮強度までの応力上昇域における除荷・再载荷剛性は、コンクリートのヤング係数 E_c としている。

圧縮強度後の劣化域から除荷後に向かう点 ϵ' は、除荷点からコンクリートのヤング係数 E_c で除荷したときに向かう点 ϵ'_1 と、圧縮強度時に除荷したときに向かう点 ϵ_0 の中点 $\epsilon' = (\epsilon_0 + \epsilon'_1)/2$ としている。

3. 実験値と解析値の比較

3.1 実験概要と解析用データ

比較に用いた実験は、文献17)に報告された H 形鋼片持ち梁の繰返し加力実験で、試験体 No.2 と試験体 No.5 の2体である。試験体 No.2 は、 \square -300×300×12の角形鋼管柱に取り付いている合成梁で、試験体 No.5 は、BH-300×300×16×16の H 形鋼柱に取り付いている合成梁である。鉄骨梁は全て BH-350×150×9×12、スタッドコネクタは 13 φ、L-55 であり、所要本数は試験体が完全合成梁になるよう「各種合成構造設計指針・同解説」¹⁸⁾に準拠して算定されている。

コンクリートスラブの厚さは 70 mm、幅は指針¹⁸⁾による有効幅(1350mm)より若干広い1500mm である。

鋼梁の板厚は素材試験の実測値を使い、他は公称値を使っている。解析ではこの断面を20点断面モデルに置換している。素材試験結果より、鋼材の降伏応力度 σ_y は 382.5 N/mm²、引張強さ σ_u は 504.0 N/mm²、歪硬化係数は 0.0075 とした。また、ヤング係数 E は 206100 N/mm² とした。図4には細実線で3体の素材試験結果を示しており、太破線は解析に用いた応力度-歪度関係のモデルである。

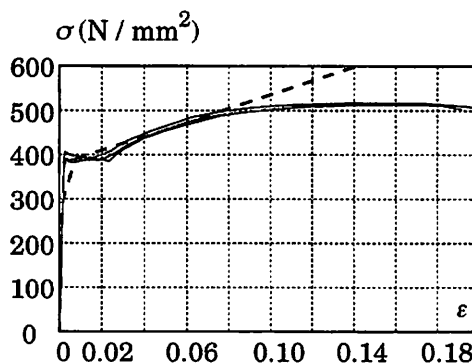


図4 鋼材の応力度-歪度関係

コンクリートスラブは5つの面積集中点にモデル化している。1つの面積集中点の断面積は、スラブ厚 70mmと有効幅から求めた断面積を5等分した値としている。コンクリートの応力度-歪度関係については、圧縮強度 σ_c は素材試験の結果より、 21.83 N/mm^2 を用いた。また、ヤング係数 E_c 、圧縮強度時の歪度 ε_p 、第2分枝開始点の応力度 $\alpha\sigma_c$ 、最大歪度 ε_u は既往の研究による算定式を用いて、以下のように求めた。

$$E_c = 21000 \times \sqrt{\frac{\sigma_c}{20}}^{19)} \quad (1)$$

$$= 21940 \text{ N/mm}^2$$

$$\varepsilon_p = \frac{2\sigma_c}{E_c}^{15)} \quad (2)$$

$$= 0.00199$$

$$\alpha\sigma_c = \frac{2\sigma_c}{3}^{12)} \quad (3)$$

$$= 14.56 \text{ N/mm}^2$$

$$k_4 = \frac{E_c}{50}^{16)} \text{より,}$$

$$\varepsilon_u = \varepsilon_p + \frac{50}{E_c} \sigma_c \quad (4)$$

$$= 0.05714$$

コンクリートの応力度-歪度関係のモデルは、劣化域を含むものであり、このようなモデルでは要素長さが解析結果に大きな影響を持つ。本論で採用したコンクリートの応力度-歪度関係のモデルは、スラブ厚の2倍程度の長さの区間に生じる変形と応力の関係を表すものと考えて¹²⁾、コンクリートが劣化域に入る端部要素の長さは 140mm とした。

3.2 有効幅

まず、コンクリートスラブの有効幅について検討した。図5に示すような2種類の有効幅のモデルを考える。

- (1)有効幅モデル1：各種合成構造設計指針¹⁸⁾から求めた有効幅 1350mmが全長を通して一定としたモデルである。
- (2)有効幅モデル2：文献²⁰⁾で与えられる有効幅 $B' = (F'_c / F_c) D$ が全長を通して一定としたモデルである。ただし、 F'_c は柱によるコンクリートの終局支圧強度、 F_c はコンクリートのシリ

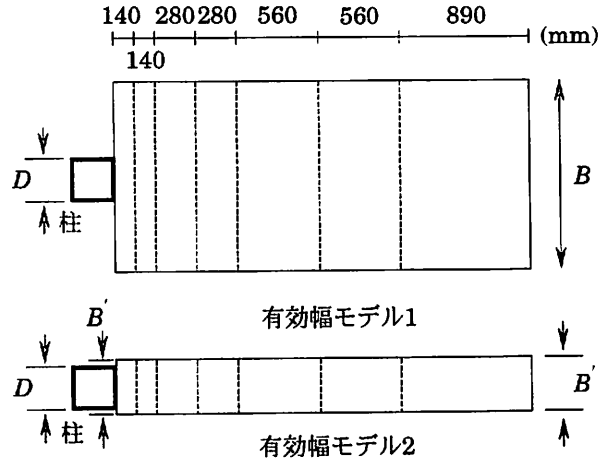


図5 有効幅モデル

ンダー圧縮強度、 D は柱幅である。柱が角形鋼管の場合は $F'_c / F_c = 1.3$ より $B' = 390 \text{ (mm)}$ 、H形鋼の場合は $F'_c / F_c = 2.0$ より $B' = 600 \text{ (mm)}$ とした²¹⁾。

要素分割は、有効幅モデル1、2とも固定端側から 140, 140, 280, 280, 560, 560, 890mm の7分割としている。

図6には、有効幅モデル1、有効幅モデル2の場合の固定端曲げモーメントと回転角の関係を示している。縦軸は固定端曲げモーメントを鋼梁の全塑性モーメントで無次元化している。図6より、有効幅モデル1では、圧縮側の各サイクルの最大変形点付近においてかなり耐力を過大評価する傾向があるが、有効幅モデル2では、試験体No.2の大変形域での耐力低下域を除き、両試験体とも、実験値をよく追跡している。よって、解析結果が実験値の耐力を近似するためには、有効幅モデル2が妥当であると判断した。

次に、弾性剛性を調べるために、図7に、初期1/2サイクルだけ（初期載荷時）を取り出し、2種の有効幅モデルについて解析結果を示している。また、表1には、初期1/2サイクル（初期載荷時）の弾性剛性の実験値と解析値を示している。ただし、実験値の弾性剛性は、測定誤差が大きいことが危惧される第1ステップを除き、それ以降で鋼梁の全塑性モーメントの2/3以下の範囲のデータから最小二乗法より求めた。図7及び表1より、弾性剛性に関して、両試験体とも、有効幅モデル1では、10～15%程度過大評価し、有効幅モデル2では、10～15%程度過小評価する傾向がある。実験値の弾性剛性は、有効幅モデル1と有効幅モデ

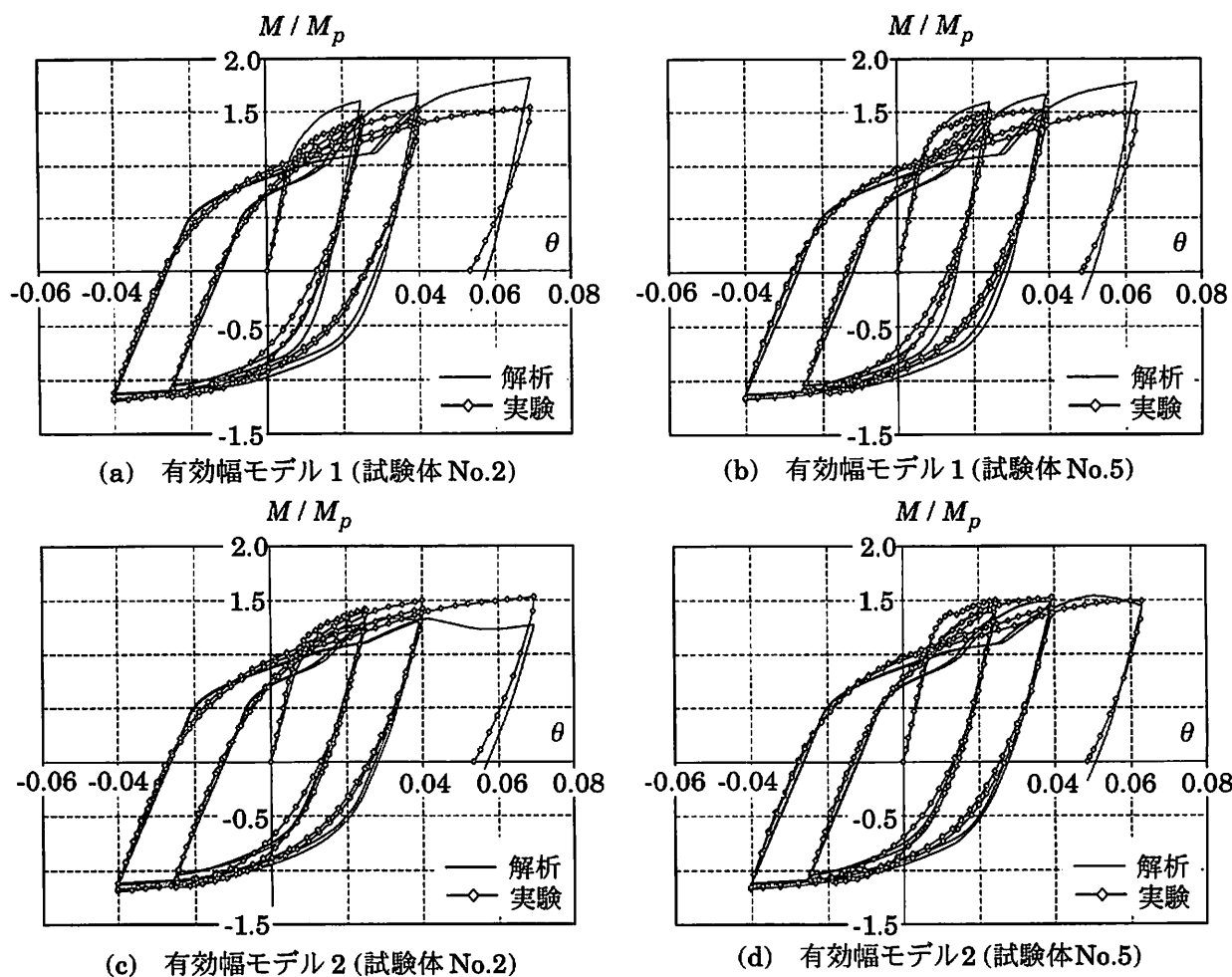


図6 実験と解析の比較

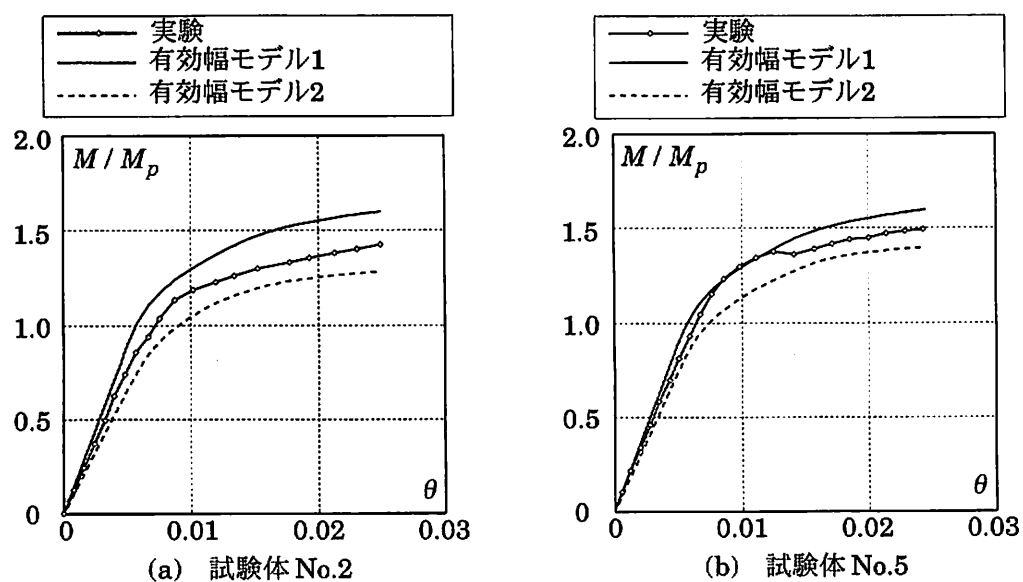


図7 初期 1/2 サイクル (初期載荷時) の比較

表1 初期 1/2 サイクル（初期載荷時）の初期剛性の比較

試験体	実験値	有効幅モデル1	有効幅モデル2	有効幅モデル1	有効幅モデル2
	初期剛性 (1 / rad)	初期剛性 (1 / rad)	初期剛性 (1 / rad)	実験値	実験値
No.2	155.9	179.8	132.6	1.153	0.850
No.5	164.3	179.8	148.7	1.094	0.905

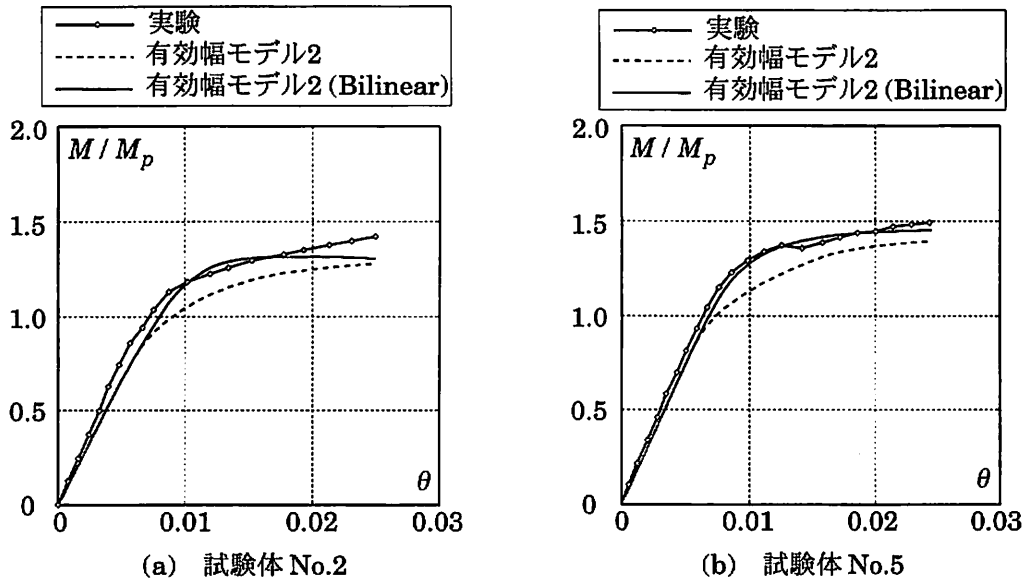


図8 初期 1/2 サイクル（初期載荷時）の比較

ル2の中間程度である。解析による弾性剛性が実験値の弾性剛性を近似するためには、有効幅モデル1と有効幅モデル2を組み合わせる必要がある。

図7によると、耐力的にも実験値は、有効幅モデル1と有効幅モデル2の中間程度であり、耐力を近似するには有効幅モデル2が適当とした前記の結果が明確には現れていない。これは、鋼材の応力度 - 歪度関係に、移動硬化と等方硬化を考慮したIKモデル^{13, 14)}を用いており、Bauschinger効果を考慮するために図4に示したTrilinear形の応力度 - 歪度関係を用いているので、初期載荷時には応力を過小に評価してしまうためである。図8には、鋼材の応力度 - 歪度関係にBilinear形を用いた場合の結果も図7と同様に示している。図8によると、Bilinear形の応力度 - 歪度関係を用いれば、有効幅モデル2によって、初期載荷時の耐力についても良好な近似が得られる。

弾性剛性に関しては、有効幅モデル1と有効幅モデル2の中間程度ということが分かり、耐力に関しては、有効幅モデル2で近似できることが分

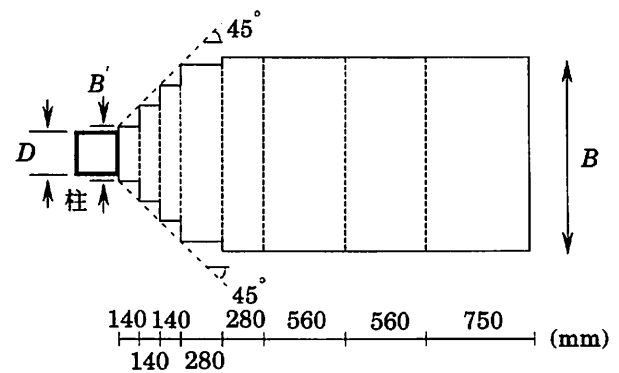


図9 有効幅モデル3

かった。そこで、解析結果の耐力、弾性剛性とも実験値を近似するために、文献12, 22)で採用されている図9に示すような有効幅モデルを考える。(3)有効幅モデル3：梁端のコンクリートスラブの圧壊領域の有効幅は、有効幅モデル2と同じ $B' = (F'_c / F_c) D$ とし、各種合成構造設計指針¹⁸⁾の有効幅1350mmまで、45°の角度で拡げる。要素分割は、固定端側から140, 140, 140, 280, 280, 560, 560, 750mmの7分割としている。

図10には、有効幅モデル3の場合の固定端曲げモーメントと回転角の関係を図6と同様に示している。

図11には、初期1/2サイクルだけ（初期載荷時）を取り出し、有効幅モデル3の解析結果を他の有効幅モデルを用いた場合と共に示している。なお、図11に示した解析では、鋼材の応力度-歪度関係にBilinear形を用いている。また、表2には、初期1/2サイクル（初期載荷時）の弾性剛性の実験値と解析値を示している。有効幅モデル3につい

て、図11及び表2より、両試験体とも、弾性剛性に関しては、実験値との差は6%以内である。また、図11によると、1/2載荷時の耐力は有効幅モデル2と同程度で、図10によると、全サイクルにおいても、大変形域での耐力低下域を除き、耐力を良く近似できていることが分かる。なお、大変形域での耐力低下域は、コンクリートスラブの応力度-歪度関係の劣化勾配が影響してくるが、この点に関しては3.3節で検討する。有効幅モデル3によって、合成梁の剛性、耐力とも実験値を近

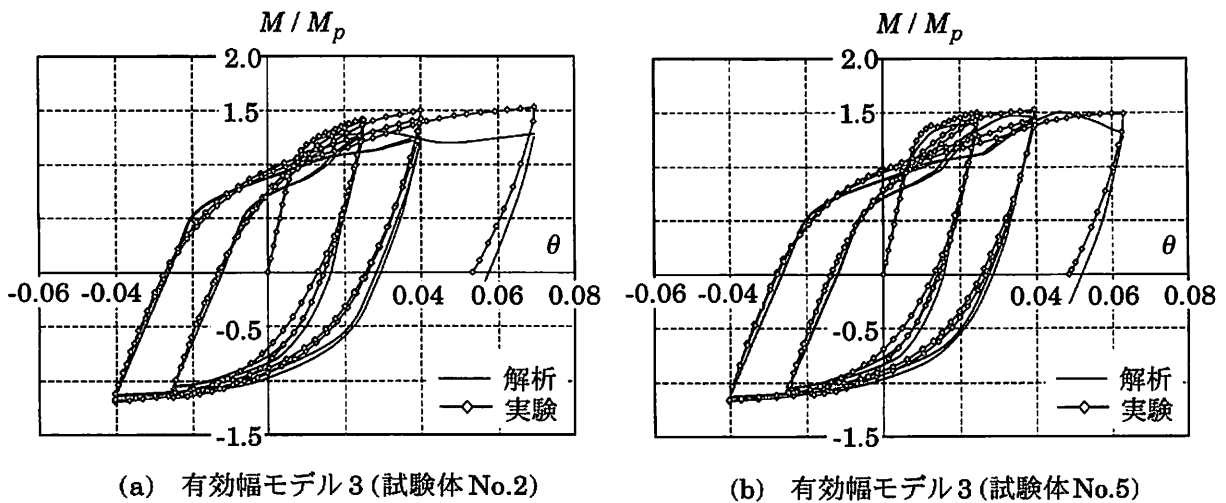


図10 実験と解析の比較

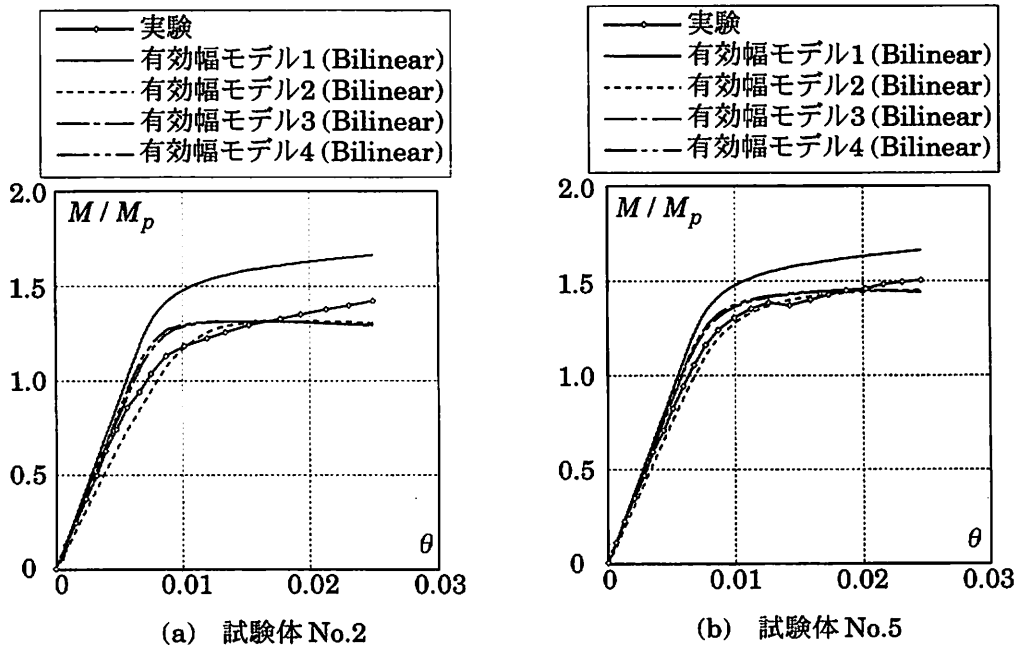


図11 初期1/2サイクル（初期載荷時）の比較

表2 初期 1/2 サイクル（初期載荷時）の初期剛性の比較

試験体	実験値	有効幅モデル3 (Bilinear)	有効幅モデル4 (Bilinear)	有効幅モデル3 (Bilinear)	有効幅モデル4 (Bilinear)
	初期剛性 (1 / rad)	初期剛性 (1 / rad)	初期剛性 (1 / rad)	実験値	実験値
No.2	155.9	165.3	171.3	1.060	1.098
No.5	164.3	172.5	175.3	1.050	1.067

似できる。

以上の結果から、有効幅モデル3が最も適切であると本論では判断したが、このモデルでは、入力データの作成も面倒である。そこで、より簡便なモデルとして、図12に示す有効幅モデル4を考える。

(4)有効幅モデル4：梁端のコンクリートスラブの圧壊領域の部分のみを $B' = (F_c' / F_c) D$ とし、残りの部分は各種合成構造設計指針¹⁸⁾ か

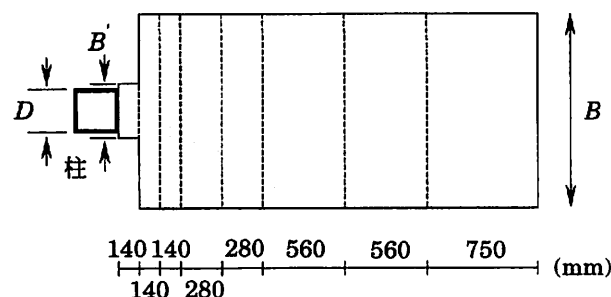


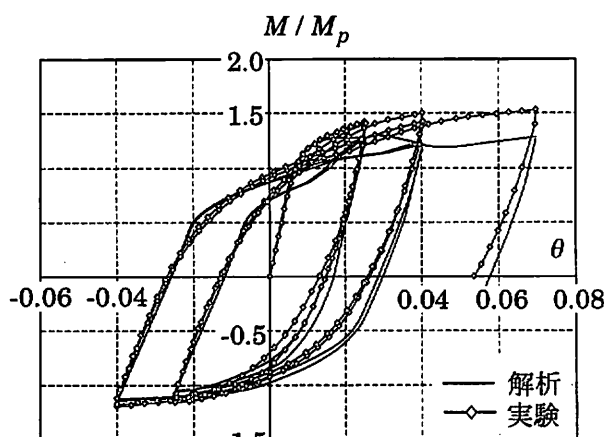
図12 有効幅モデル4

ら求めた有効幅 1350mmとする。

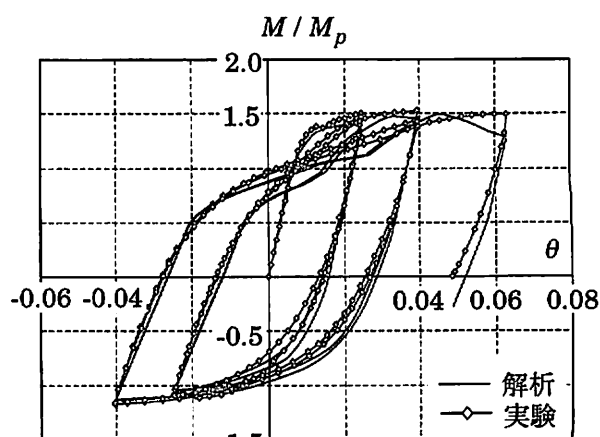
要素分割は、固定端側から 140, 140, 140, 280, 280, 560, 560, 750mm の7分割としている。

図13には、有効幅モデル4の場合の固定端曲げモーメントと回転角の関係を図10と同様に示している。また、鋼材に Bilinear 形の応力度 - 歪度関係を用いた初期 1/2 サイクル（初期載荷時）の解析結果は、図11、表2に示している。有効幅モデル4については、図11及び表2より、両試験体とも、弾性剛性に関して、実験値との差は10%以内である。耐力に関しては、図11、図13より、有効幅モデル3と同程度の結果が得られており、耐力を近似できていることが分かる。有効幅モデル4によっても、剛性、耐力とも実験値を近似できる。

また、図14には、有効幅モデル3と有効幅モデル4を用いた解析結果を比較する。図14から分かるように、両試験体とも、有効幅モデル3と有効幅モデル4の違いはほとんど認められない。有効幅モデル4でもコンクリートスラブの合成効果を十分追跡できる。多層骨組を解析する時などには、



(a) 有効幅モデル4（試験体 No.2）



(b) 有効幅モデル4（試験体 No.5）

図13 実験と解析の比較

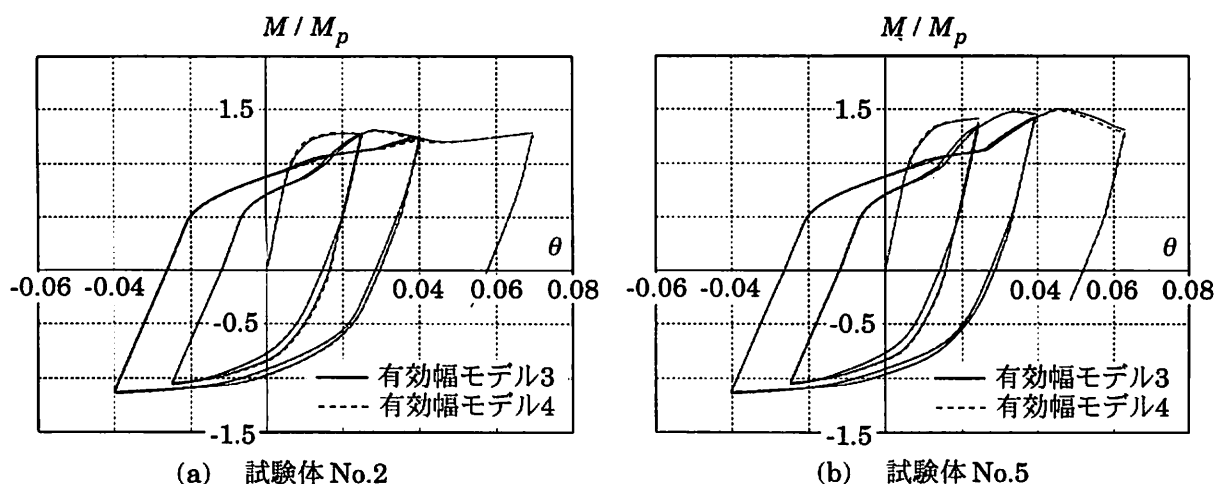


図 14 有効幅モデルの比較

入力データ作成の労力を減らすためにも、有効幅モデル 4 が適当である。

3.3 劣化勾配

前節の解析結果では、変形角が $0.03 \sim 0.04$ を超える大変形域で耐力低下を起こしている。これは、コンクリートスラブの応力度 - 歪度関係における劣化勾配の影響である。この節では、既往の研究で用いられた 4 種類の劣化勾配を用いて解析を行い、その結果を比較することによって、コンクリートスラブにおける応力度 - 歪度関係の劣化勾配が解析結果に及ぼす影響について検討する。

文献 23) では、RC 床スラブの解析で、以下に示す劣化勾配が用いられている。

$$k_4 = 0.24 E_c \quad (5)$$

文献 24) では、RC 梁の解析で、以下に示す劣化勾配が用いられている。

$$k_4 = 0.10 E_c \quad (6)$$

文献 23) と文献 24) では、解析値は実験値の荷重 - 変位曲線を良く近似しているが、コンクリートの応力度 - 歪度関係における劣化勾配の影響は解析値にも実験値にも明確に現れていない。

文献 16) では、合成梁骨組の地震応答解析で、以下に示す劣化勾配が用いられている。ただし、文献 16) では、この劣化勾配に対する根拠は示されていない。

$$k_4 = 0.02 E_c \quad (7)$$

文献 22) では、合成梁の解析で、コンクリートが耐力低下を起こす前までを対象とすることを前提として、コンクリートの劣化を無視している。

すなわち、

$$k_4 = 0 \quad (8)$$

文献 22) では、合成梁が耐力低下を示す変形角 $0.03 \sim 0.04$ よりも大きな大変形域では、解析値は実験値の耐力を過大に評価しているが、実験値が耐力低下を示す以前の変形域においては、適切に剛性、耐力とも評価されている。

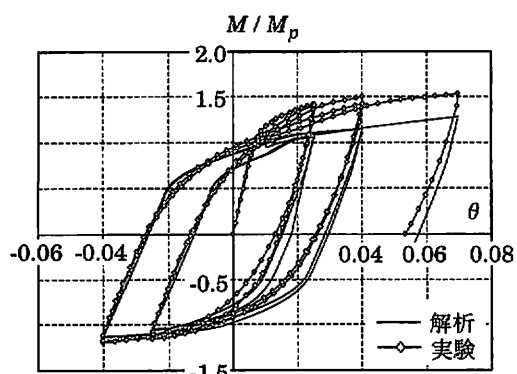
この 4 種類の劣化勾配に関して、有効幅モデル 4 の場合の固定端曲げモーメントと回転角の関係を図 15 に示す。

(5) 式の $k_4 = 0.24 E_c$ を用いた解析値を示した図 15 の (a), (b) と、(6) 式の $k_4 = 0.10 E_c$ を用いた解析値を示した図 15 の (c), (d) では、いずれの解析結果も初期 1/2 サイクル载荷中 (初期载荷中) に、耐力低下を起こし、それ以降は純鉄骨梁と同じ程度の耐力となっている。すなわち、解析値は実験値に比べて、かなり早期に耐力低下を生じている。

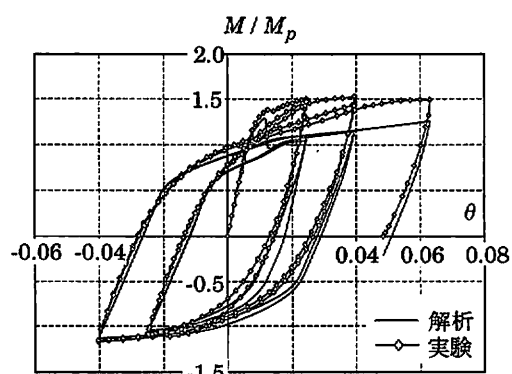
(7) 式の $k_4 = 0.02 E_c$ に関して示した図 15 の (e), (f) は、図 13 で示した図と同じものであるが、前節でも述べたように、試験体 No. 2 の大変形域では純鉄骨梁と同程度の耐力になっているが、(a) ~ (d) 図と比べ、解析値が実験値を良く近似できている。

(8) 式の $k_4 = 0$ に関して示した図 15 の (g), (h) では、文献 22) で示されていたように、変形角が 0.04 を超える領域では、耐力を過大に評価する傾向は認められるが、それ以前のサイクルでは実験値を最もよく近似できている。

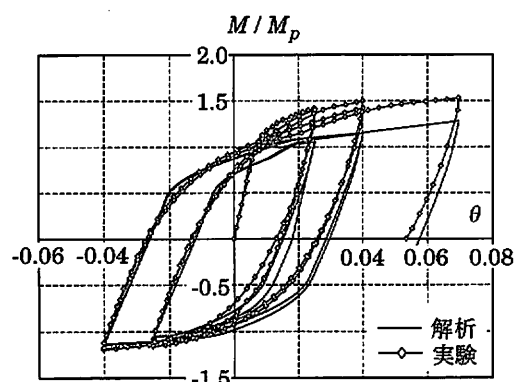
劣化勾配 $k_4 = 0.24 E_c$ と $k_4 = 0.10 E_c$ は、RC 床スラブと RC 梁の解析において用いられていた



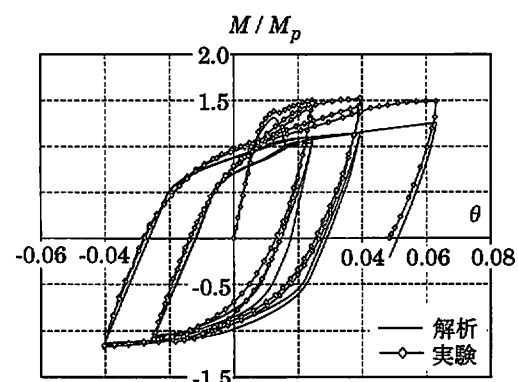
(a) $k_4 = 0.24 E_c$ (試験体 No.2)



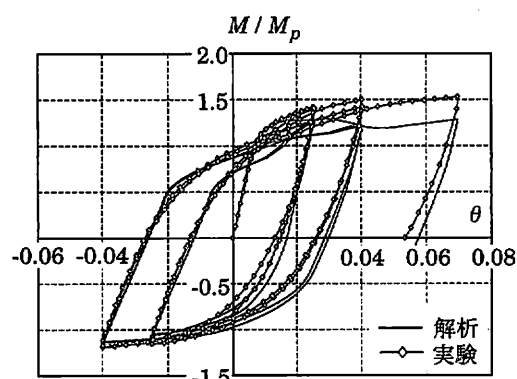
(b) $k_4 = 0.24 E_c$ (試験体 No.5)



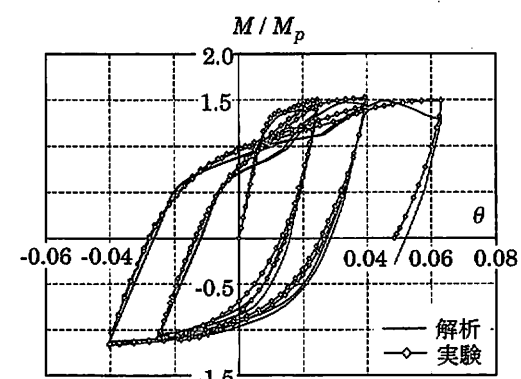
(c) $k_4 = 0.10 E_c$ (試験体 No.2)



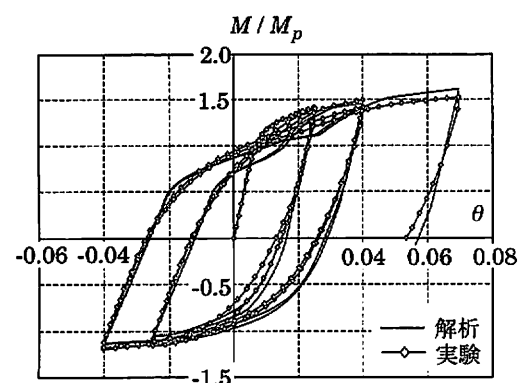
(d) $k_4 = 0.10 E_c$ (試験体 No.5)



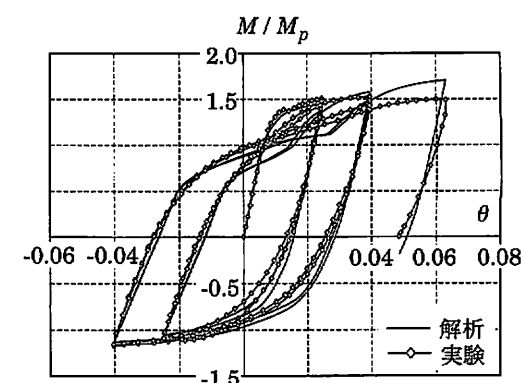
(e) $k_4 = 0.02 E_c$ (試験体 No.2)



(f) $k_4 = 0.02 E_c$ (試験体 No.5)



(g) $k_4 = 0$ (試験体 No.2)



(h) $k_4 = 0$ (試験体 No.5)

図15 劣化勾配の比較

劣化勾配であり、これらの値では今回の合成梁の解析には不適切である。また、最も適したコンクリートスラブの応力度-歪度関係における劣化勾配は $k_4 = 0.02 E_c$ と $k_4 = 0$ の中間程度と推測される。つまり、ほとんど劣化勾配は考えなくても良いという結果となる。今回比較に用いた実験が直交梁を有した合成梁であり、柱に接するコンクリートスラブが圧壊した後は、直交梁を介して応力が伝達されることが、急激に耐力低下を起こさない原因の1つとして挙げられる。文献(25)の直交梁を有する合成梁の実験においてもコンクリートスラブの圧壊に伴う急激な耐力低下はなかったと報告されている。このような結果だけから判断すると、極端に大きな変形を対象としない限り、コンクリートの最大応力点以降の劣化は、無視してもよいと思われる。

3.4 面積集中心

ここでは、断面のモデル化における面積集中心の数が解析結果に及ぼす影響を検討する。ここまでの解析では、鉄骨梁断面の面積集中心の数は20、コンクリート断面の面積集中心の数は5で解析を行ってきた。一方、鉄骨梁断面に、非対称な残留応力を考慮できる最小モデルである4点断面モデルを用いることで、実断面の挙動を近似できることが報告されている^{26~28)}。また、図2に示した本論の解析モデルにおいて参考にした文献(12)では、コンクリートスラブは1つの面積集中心として解析を行っている。これらのことを考慮に入れ、鉄骨梁断面部分は4点断面モデルを、コンクリート断面部分は1点断面モデルを用いた解析を行った。

図16は、固定端曲げモーメントと回転角の関係を比較したもので、鉄骨梁断面の面積集中心の数が4、コンクリート断面の面積集中心の数が1である4+1点モデルと、鉄骨梁断面の面積集中心の数が20、コンクリート断面の面積集中心の数が5である20+5点モデルの2つの場合に関して示している。なお、これらの解析では、有効幅モデル4、コンクリートスラブの応力度-歪度関係における劣化勾配は $0.02 E_c$ を用いている。

図16より、試験体No.5の圧縮側の最終サイクルの最大耐力点以降で、少し両者に差が認められるものの、試験体No.5の他のサイクル及び、試験体No.2では、ほとんど差は認められない。4+1点モデルでも、20+5点モデルとほぼ同程度の解析が可能である。

4. 結論

本研究では、既往の研究^{12~21)}を参考にして合成梁のモデル化を行い、H形鋼片持ち梁(合成梁)の繰返し加力実験の結果と比較することによって、適切な合成梁モデルを決定した。また、有効幅及びコンクリートの応力度-歪度関係における劣化勾配が弾性剛性や曲げ耐力にどう影響を及ぼすかを検討した。その結果を要約すると以下のようになる。

- (1) 各種合成構造設計指針¹⁸⁾から求めた有効幅が全長を通して一定とした有効幅モデル1では、弾性剛性及び曲げ耐力を過大評価する傾向がある。
- (2) 柱幅にコンクリートの終局支圧強度と圧縮強度の比を乗じた有効幅が全長を通して一定とした有効幅モデル2では、弾性剛性は過小に評価

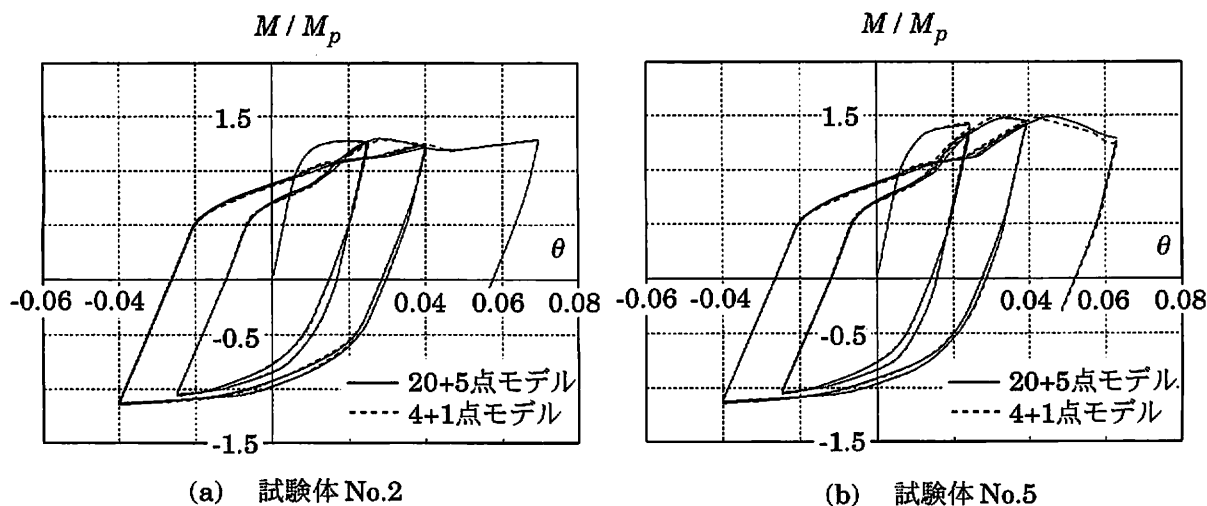


図16 4+1点モデルと20+5点モデルの比較

する傾向があるが、曲げ耐力は適切に評価できる。

- (3) 梁端のコンクリートスラブの圧壊領域の有効幅は、有効幅モデル2と同じ有効幅を用い、各種合成構造設計指針¹⁸⁾の有効幅まで 45° の角度で拡張した有効幅モデル3では、弾性剛性及び曲げ耐力を適切に評価できる。
- (4) 梁端のコンクリートスラブの圧壊領域の部分のみを有効幅モデル2と同じ有効幅を用い、残りの部分を各種合成構造設計指針¹⁸⁾から求めた有効幅とした有効幅モデル4は、弾性剛性及び曲げ耐力を適切に評価できる。多層骨組をモデル化する時などには、入力データ作成の労力を減らすためにも、このモデルが妥当である。
- (5) コンクリートの応力度-歪度関係における劣化勾配 k_4 は、ヤング係数の 0.02 倍または 0 程度の値を用いるのが適当である。
- (6) 断面のモデル化については、鉄骨梁断面を4つの面積集中点で表し、コンクリート断面を1つの面積集中点とすることで、良好な近似が得られる。

謝辞

本研究を進めるにあたって、京都大学大学院工学研究科 井上一郎教授から貴重な実験データを頂きました。

参考文献

- 1) 小川厚治・中原寛章：強震を受ける鋼構造ラーメン骨組の梁に生じる塑性変形（その1：最大変形），日本鋼構造協会鋼構造論文集，第10巻，第39号，pp.89-104，2003.9
- 2) 小川厚治・中原寛章：強震を受ける鋼構造ラーメン骨組の梁に生じる塑性変形（その2：履歴挙動），日本鋼構造協会鋼構造論文集，第10巻，第39号，pp.105-120，2003.9
- 3) 中原寛章・小川厚治：強震を受ける鋼構造ラーメン骨組の柱脚に生じる塑性変形，日本鋼構造協会鋼構造論文集，第12巻，第45号，pp.155-169，2005.3
- 4) 小川厚治・多田元英：柱・梁接合部パネルの変形を考慮した静的・動的応答解析プログラムの開発，第17回情報システム利用技術シンポジウム，pp.79-84，1994.122
- 5) 日本建築学会近畿支部鉄骨構造部会：1995年兵庫県南部地震鉄骨造建物被害調査報告書，1995.5
- 6) 日本建築学会：兵庫県南部地震における鋼構造の被害と教訓，1996.7
- 7) 岡田健・呉相勲・山田哲・今枝知子・山口路夫・和田章：従来型の柱梁接合部を有する合成梁の変形能力に関する実験的研究（合成梁の変形能力を反映した鋼構造骨組の耐震性評価 その1），日本建築学会構造系論文集，第547号，pp.161-168，2001.9
- 8) 藤田譲・大坪英臣・湯原哲夫：構造物の塑性設計（その10 高軸圧をうける平面フレーム構造の大撓み弾塑性解析），日本造船学会論文集，第126号，1969.11
- 9) 藤本盛久・須藤福三・和田章：任意形平面骨組の非線形応力解析，日本建築学会論文報告集，第189号，1971.11
- 10) R.Tanabashi, T.Nakamura and S.Ishida: Gravity Effect on the Catastrophic Dynamic Response of Strain-Hardening Multi-Story Frames, Proc. of 5th WCEE, 1978.6
- 11) 藤本盛久・和田章・白方和彦・小杉立：筋違付鉄骨ラーメンの弾塑性解析に関する研究，日本建築学会論文報告集，第209号，1973.7
- 12) 松蔭知明・多田元英・松本圭子：異種プログラムの統合による鋼骨組のプッシュオーバー解析 その2：合成梁解析と骨組解析の統合，日本建築学会大会学術講演梗概集，2005.9
- 13) 山田稔・辻文三：鋼材の応力-歪関係に関する研究（I：等方+移動硬化モデル），日本建築学会論文報告集，第270号，pp.17-22，1978.8
- 14) 小川厚治・永元亮太：強震を受ける鋼構造ラーメン骨組の梁に生じる最大曲げモーメント，日本建築学会構造系論文集，第580号，pp.121-128，2004.6
- 15) 斉藤成彦・中村光・檜貝勇：剛体-バネモデルを用いた軸方向圧縮力をうけるRC梁のせん断破壊挙動の数値解析，コンクリート工学論文集，第12巻第2号，pp.71-81，2001.5
- 16) 鈴木勇・青木博文：床スラブの影響を考慮した鋼構造骨組梁端ひずみの挙動，日本鋼構造協会鋼構造年次論文報告集，第4巻，pp.129-134，1996.11
- 17) 立山英二・井上一郎・辻岡静雄・新井努：鉄骨梁に接合される合成梁の耐力，剛性と変形性能に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，1989.10
- 18) 日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説，1985
- 19) 日本建築学会：鉄筋コンクリート計算規準・同解説-許容応力度設計法-，2000.4
- 20) 加藤勉・田川泰久・西尾裕：合成ばり履歴モデルの検証，日本建築学会大会学術講演梗概集，1987.10
- 21) 日本建築学会：鋼構造限界状態設計指針・同解説，1998
- 22) 加藤勉・田川泰久：合成ばり履歴モデルの提案，日

本建築学会大会学術講演梗概集, 1987.10

- 23) 皆川洋一: 鉄筋コンクリート造床スラブの弾塑性挙動へ及ぼす幾何学的非線形性の影響, 日本建築学会構造論文報告集, 第361号, pp132-139, 1986.3
- 24) Han seung LEE・野口貴文・友澤史紀: 引張主筋の腐食したRC梁の有限要素法による耐力性能評価に関する基礎的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第506号, pp.43-50, 1998.4
- 25) 五十嵐定義・井上一朗・金成垠・多田元英: 正負両曲げを受ける合成ばりの弾塑性履歴性状に関する実験的研究, 日本建築学会論文報告集, 第333号, pp.63-72, 1983.11
- 26) 山田稔・坂恵一己・田所敏幸・白川潔: 軸圧をうけるH形鋼柱の弾塑性曲げ変形状に関する研究(I:一方向載荷時における曲げモーメント曲率関係並びに曲げ変形状), 日本建築学会論文報告集, 第127号, 1966.9
- 27) 重石恒雄・田中尚: 繰返し軸力を受ける鋼部材復元力特性に関する研究, 生産研究, 1974.2
- 28) 五十嵐定義・井上一朗・小川厚治: 鋼構造平面骨組の弾塑性解析法に関する研究, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 1974.6